

DIAGRAFÍAS: SU APLICACIÓN EN EL ANÁLISIS SEDIMENTARIO

M.J.Jurado(1)

(1) GESSAL, Idioma Esperanto 9, 5.º 28017-MADRID

RESUMEN

Se analizan los aspectos de la interpretación de diagraffas que son de interés para el análisis de series sedimentarias. La interpretación de diagraffas es una herramienta fundamental en el análisis sedimentológico y estratigráfico en el subsuelo. Mediante esta técnica es posible establecer la serie litológica, la litoestratigrafía y en su caso, las electrosecuencias, las electrofacies, las unidades sedimentarias y discontinuidades. La correlación entre sondeos mediante las diagraffas permite analizar la evolución lateral y las geometrías de las unidades sedimentarias. Cuando se dispone de suficientes sondeos con una información adecuada, puede abordarse la interpretación de la evolución y de las características de la sedimentación en la cuenca.

Es conveniente que las interpretaciones de las series en el subsuelo realizadas a partir de las diagraffas se comparen siempre que ello sea posible con estudios de las mismas series en la superficie. Por otra parte, es deseable el apoyo de las interpretaciones con otras técnicas geofísicas, especialmente perfiles sísmicos, que pueden permitir un mayor control de las geometrías, la extensión, la profundidad y los rasgos estructurales de las unidades sedimentarias.

Palabras clave: diagraffas, electrofacies, electrosecuencias, geofísica, geología del subsuelo, análisis sedimentario.

ABSTRACT

The main aim of this paper is to outline the interest of wireline geophysical logging interpretation in sedimentary analysis. Well log interpretation is a geophysical technique useful to analyze lithological and sedimentological features of sedimentary series in the subsurface. From well logs it is possible to infer the lithology (fig 1), lithostratigraphy and even sedimentary sequences (as electrosequences), sedimentary facies (as electrofacies), sedimentary units and unconformities (figs. 2, 3, 4, 5, 6). Well-to-well correlation is the way to analyze lateral evolution and geometry of the sedimentary units and facies from wireline logs (figs. 4, 5). If well data and log quality are good enough it is possible to reconstruct sedimentary basin evolution.

Outcrop data are usually a valuable information to compare with well log interpretations. It is always desirable to compare also with other geophysical methods, particularly seismic interpretation which can help in determining geometry, extension, depth and structural trends of the sedimentary units.

Key words: wireline well logs, electrofacies, electrosequences, geophysics, subsurface geology, sedimentary analysis.

Jurado, M.J. (1989): Diagraffas: su aplicación en el análisis sedimentario. *Rev. Soc. Geol. España*, 2: 291-301.

Jurado, M.J. (1989): Wireline logs: their use in sedimentary analysis. *Rev. Soc. Geol. España*, 2: 291-301.

1. INTRODUCCIÓN.

Con este trabajo se pretende ilustrar el tipo de resultados que es posible obtener a partir de la interpretación de las diagrafas de sondeos en relación con el análisis sedimentario y la definición o identificación de unidades sedimentarias.

Queda fuera del ámbito del trabajo el tratar los aspectos metodológicos de la elaboración que se realiza en este tipo de estudios.

Los ejemplos que aquí se presentan proceden de la interpretación de diagrafas de sondeos de prospección de hidrocarburos en la cuenca de Ebro, que se registraron principalmente en los años 60 y 70.

2. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE UNA TÉCNICA PETROLERA.

La interpretación de las diagrafas de sondeos es una de las técnicas básicas que se han aplicado en la exploración de hidrocarburos desde finales de los años 20.

Originalmente las diagrafas, también llamadas perfiles de testificación geofísica o *logs*, se registraron para la localización y la caracterización de niveles porosos, para el cálculo de parámetros como la porosidad y la saturación de las rocas y para caracterizar los fluidos de la formación (tipos de fluidos, salinidades, etc.). A pesar de ser ése el origen y el interés inicial que dio lugar al desarrollo de la testificación geofísica de los sondeos, su potencial como herramienta de estudio geológico en el subsuelo no tardó en ponerse de manifiesto.

Una de las primeras aplicaciones geológicas de las diagrafas fue la de herramienta de correlación de unidades entre sondeos. De hecho, las diagrafas han constituido y constituyen el instrumento esencial de la correlación estratigráfica y de las unidades sedimentarias en el subsuelo.

A finales de los años 50 y paralelamente al desarrollo de la Sedimentología, que adquiría interés en la prospección de recursos naturales, se descubrió el potencial de las diagrafas como instrumento del análisis sedimentológico. Actualmente las grandes compañías especializadas cuentan con herramientas y registros cuya aplicación más directa la constituye el análisis sedimentológico y permiten el reconocimiento de texturas y estructuras de escala centimétrica y eventualmente milimétrica.

Las diferentes etapas de desarrollo tecnológico experimentadas desde el nacimiento de esta técnica en los años 20, han repercutido en el perfeccionamiento de las herramientas y de los sistemas de registro. Las diagrafas "clásicas" como las de radiactividad natural ("*gamma ray*"), acústicas ("*sonic*"), de resistividad e inducción y de densidad han mejorado en calidad y precisión y, ya recientemente, se han desarrollado nuevas herramientas que permiten una interpretación litológica precisa como las diagrafas de litodensidad o se-

dimentológica de detalle como los registros de buzamientos estratigráficos de alta resolución.

3. LA INTERPRETACIÓN DE LAS SERIES SEDIMENTARIAS EN EL SUBSUELO.

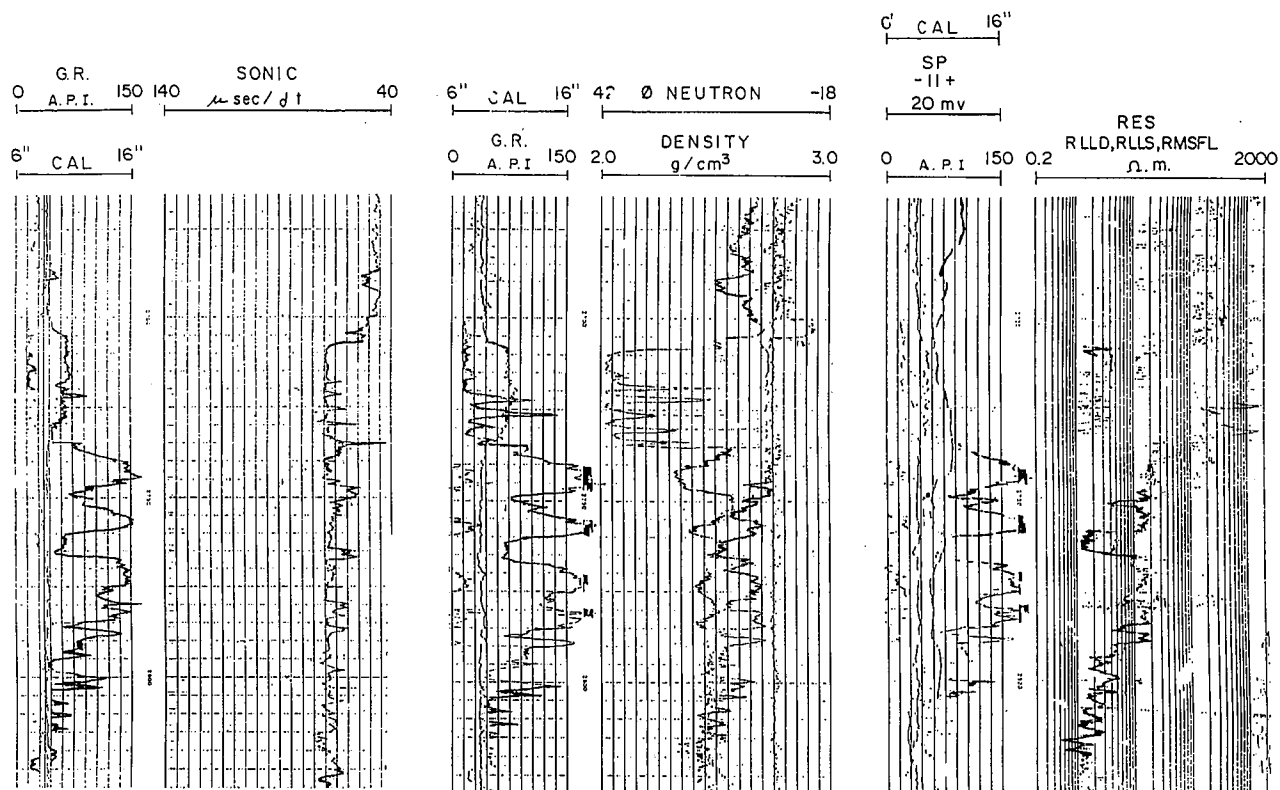
El conjunto de las diagrafas que se registran en un sondeo ofrecen una imagen continua en función de la profundidad de la serie sedimentaria atravesada. Las sondas de testificación geofísica son sensibles a las propiedades físicas de las rocas y miden los valores de los diferentes parámetros. Las curvas registradas corresponden a las líneas que unen los puntos de medida para cada uno de los diferentes parámetros (radiactividad natural, resistividad, potencial espontáneo, velocidad de las ondas acústicas, etc, etc.) en función de la profundidad. Los registros así obtenidos son las diagrafas.

La mineralogía, textura, estructura y los fluidos de las rocas dan lugar a diferentes respuestas y condicionan el valor de los parámetros que se registran en las diferentes diagrafas. Estos factores pueden ser la causa del "carácter" que un tramo o unidad determinados pueden presentar sobre las diagrafas.

En función de la respuesta en las diferentes diagrafas, se pueden interpretar las propiedades mineralógicas, y texturales de las rocas, así como el contenido en fluidos y sus características. Cada diagrafía puede reflejar determinadas propiedades, así por ejemplo, el registro acústico "*sonic*" responde a las propiedades texturales, mineralógicas y al contenido en fluidos, el de radiactividad natural a la mineralogía, el de densidad a la mineralogía y a los fluidos y textura, el índice de hidrógeno o de neutrones al fluido y en menor medida a la textura, los de resistividad a la textura y al fluido, el potencial espontáneo al fluido y en menor medida a la textura y a la estructura, la sección de captura fotoeléctrica a la mineralogía, el *dipmeter* ("buzómetro") a la estructura y en menor medida a la textura y a la mineralogía y el *caliper* ("calibrador" o "diametrador") a la textura y a la mineralogía (Serra y Abbott, 1980).

A partir del análisis del conjunto de diagrafas se establece la relación entre las diferentes respuestas y las características de las rocas en términos de litología, textura, estructuras, etc. Este proceso constituye la interpretación de las diagrafas. A efectos de la interpretación puede decirse de forma general, que cuanto mayor sea el número de registros y mejor su calidad, la interpretación se enriquece con más datos y por tanto suele ser más fiable. Serra (1986) ilustra este aspecto considerando que la imagen obtenida a partir de las diagrafas es como un espectro, que es tanto más rico y los rayos que lo componen más netos cuanto mayor sea el número de medidas de diagrafas de diferente naturaleza.

Las técnicas de la interpretación de diagrafas, apoyadas en las descripciones de ripios y en su caso de testigos, permiten la reconstrucción de la sucesión litológica vertical de las series estratigráficas atravesadas por



G.R. = Radiactividad natural

CAL = Diámetro del sondeo

SONIC = Tiempo de tránsito de las ondas acústicas

Ø NEUTRON = Porosidad de neutrón

DENSITY = Densidad

SP = Potencial espontáneo

RES = Resistividad

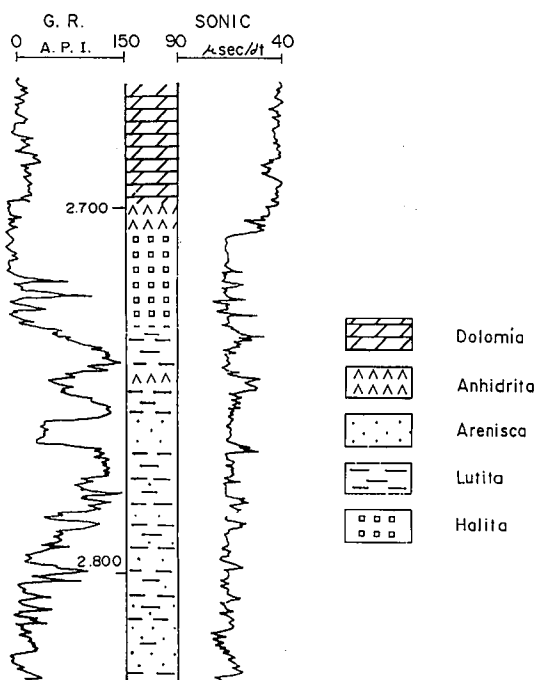


Fig. 1.-Ejemplo de interpretación de un tramo de la columna litológica de un sondeo. En la parte superior los registros a partir de los cuales se realiza la interpretación. En la parte inferior la columna litológica interpretada que se presenta junto a dos de los registros más significativos. Sondeo Ebro-2, Triásico de la Cuenca del Ebro.

Fig. 1.-An example of lithological interpretation of wireline geophysical well logs. In the upper part the original logs. In the lower part the interpreted log. Ebro-2 well, Ebro basin Triassic.

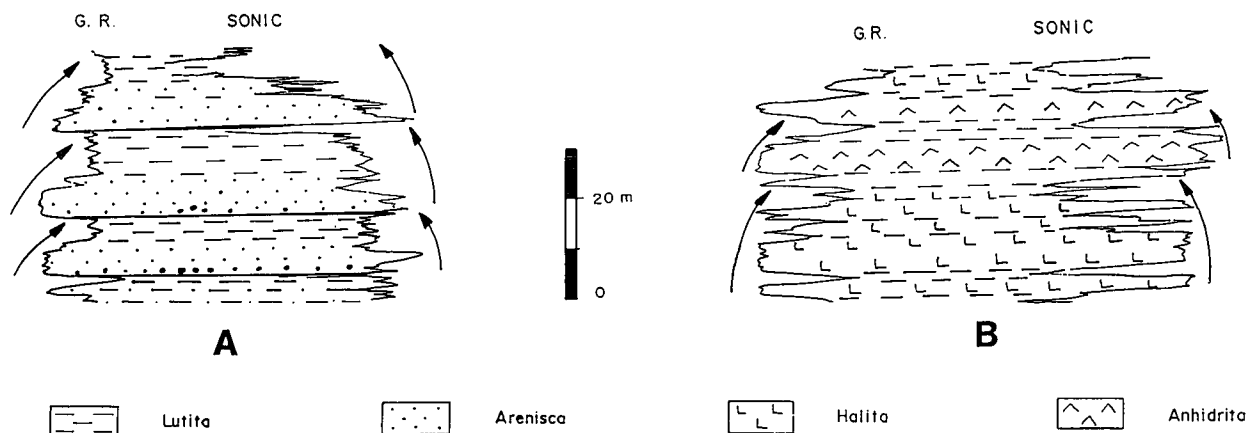


Fig. 2.-a.- electrosecuencias: secuencias granodecipientes en series detríticas, sondeo Caspe-1, facies Buntsandstein. b electrosecuencias en series evaporíticas. Sondeo Zuera-1, facies Keuper.

Fig. 2.-a.- electrosequences: upwards finings sequences. b.- electrosequences in evaporites. Zuera-1 well. Keuper facies.

los sondeos (figura 1). Sobre las series interpretadas y sobre las propias diagrfias se desarrolla el análisis estratigráfico y sedimentológico (figuras 2, 3, 4, 5, 6), que puede dar lugar a la identificación de unidades sedimentarias y de los rasgos sedimentológicos de las mismas.

En el proceso de la interpretación de las diagrfias se realiza en primer término una interpretación del perfil litológico vertical, en el que se representan las litologías en función de la profundidad (figura 1). Esta reconstrucción se realiza en general de forma cualitativa a partir de los registros, aunque para la determinación litológica pueden utilizarse también gráficos de relación ("cross-plots") de los valores registrados en diferentes diagrfias o bien programas de interpretación automatizada.

La interpretación de detalle de las diagrfias suele realizarse a escala 1:500 o 1:200 (pudiendo llegar a ser 1:20). La resolución de las herramientas aunque variable, suele oscilar entre el orden decimétrico a métrico, pero algunas herramientas modernas realizan registros con mayor resolución. Como valor estándar del muestreo o medida que efectúan las diferentes herramientas Serra y Abbott (1980) consideran unos 15 cm, aunque algunas herramientas realizan las lecturas cada 5 cm, cada 5 mm o incluso las modernas herramientas de alta resolución cada 2,54 mm.

La calidad y la validez de la interpretación están en relación con el tipo de registros de que se disponga. Para la caracterización litológica y sedimentológica de las series son interesantes los registros de radiactividad natural y de potencial espontáneo, los acústicos, neutrónicos, de densidad y resistivos, entre las diagrfias que podemos considerar "clásicas". Recientemente han aparecido herramientas que registran la espectrometría de las radiaciones, efectos de captura fotoeléctrica, imágenes de "scanner"; microresistividades que permiten analizar buzamientos de escala milimétrica, análisis de componentes de las ondas acústicas que permi-

ten reconocer la fracturación, etc. y que abren múltiples posibilidades al análisis sedimentario.

La combinación de diferentes registros puede resultar más o menos idónea para la interpretación de un determinado tipo de materiales. Así por ejemplo, son de gran interés en el estudio de series evaporíticas los registros de espectrometría de la radiactividad natural, los de densidad, sónicos y de absorción fotoeléctrica, mientras que para el estudio de series detríticas es interesante contar con los registros de radiactividad natural, eléctricos en general y de neutrones.

En relación a las posibilidades de la interpretación de las diagrfias, es preciso destacar que la respuesta de las diagrfias no siempre responde exclusivamente a las propiedades geológicas de las rocas sino que, a menudo, los valores que se registran también responden y están afectados por otros factores como las condiciones del pozo, los métodos de perforación, los lodos de perforación, entubaciones, etc, factores que es preciso tener muy presentes a fin de no realizar interpretaciones erróneas.

La interpretación de las series a partir de las diagrfias puede ofrecer en ocasiones una imagen de la serie sedimentaria más completa que la que se obtendría en estudios de superficie, tal suele ser el caso en series evaporíticas (fig. 4).

También a menudo es posible observar sobre las diagrfias ciertos rasgos característicos que se detectan por la sensibilidad de las sondas a propiedades físicas específicas, debidas por ejemplo a niveles con acumulación de elementos radiactivos, discontinuidades, etc.. La identificación e interpretación de los mismos presenta un indudable interés en el análisis estratigráfico y sedimentológico de las series y en el análisis de la cuenca.

Otro aspecto destacable lo constituye el hecho que, la interpretación de las diagrfias de un sondeo puede permitir la reconstrucción de una serie estratigráfica continua de varios kilómetros, en la que puede quedar

reflejada la historia sedimentaria de una cuenca, lo que supone una gran ventaja en relación a las limitaciones que, en este sentido presentan los estudios de superficie.

Siempre que ello sea posible es fundamental complementar la interpretación de las series en el subsuelo, realizada a partir de las diagrafas con el estudio de testigos y con el reconocimiento de las series en superficie.

4. ELEMENTOS DEL ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO.

Mucha de la información necesaria para caracterizar las facies sedimentarias queda reflejada en las dia-

grafías ya que, los diferentes registros responden en mayor o menor medida a la mineralogía, la textura y la estructura de los materiales sedimentarios. Cada diagrafía puede considerarse como una imagen parcial de la respuesta a esos parámetros y el conjunto de las diagrafas, una imagen de la facies geológica. Por lo general, cuanto más completo sea el conjunto de diagrafas, mejor será la imagen de la facies real y más fácil y fiable resultará la interpretación.

El análisis sedimentológico a partir de las diagrafas se fundamenta en el examen de la "forma" o del carácter de las curvas. El gradiente de las curvas puede dar idea de la secuencia granulométrica y del tipo de contactos entre los cuerpos sedimentarios. Los perfiles

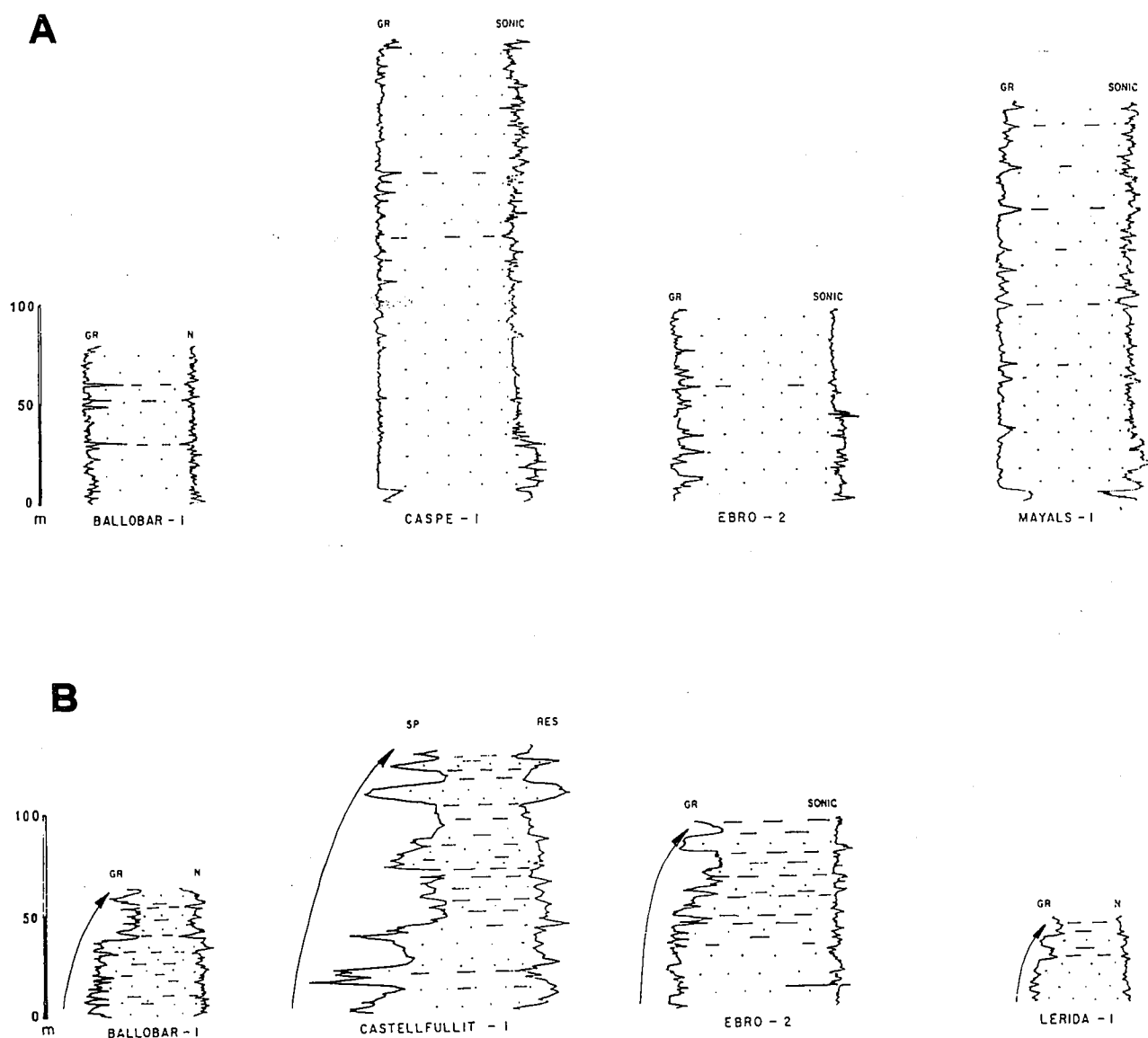


Fig. 3.-Ejemplos de electrofacies en series detríticas. Las electrofacies pueden distinguirse en los diferentes registros que se han utilizado: radioactividad natural (GR) y potencial espontáneo (SP) a la izquierda y de neutrones (N), sónico (sonic) y de resistividad (RES) a la derecha. a - facies de areniscas masivas, b - facies de areniscas y lutitas con secuencias granodecrecientes: el conjunto de estas facies constituye una secuencia granodecreciente. Facies Buntsandstein. Triásico de la cuenca del Ebro.

Fig. 3.-Electrofacies examples in detritic series. Electrofacies can be identified in different logs: gamma-ray (GR), spontaneous potential (SP) on the left and neutron (N), sonic (sonic) and resistivity on the right. a - massive sandstone facies, b - sandstone and shale facies in an upward fining sequence, formed by several, smaller upward fining sequences. Buntsandstein facies. Ebro basin Triassic.

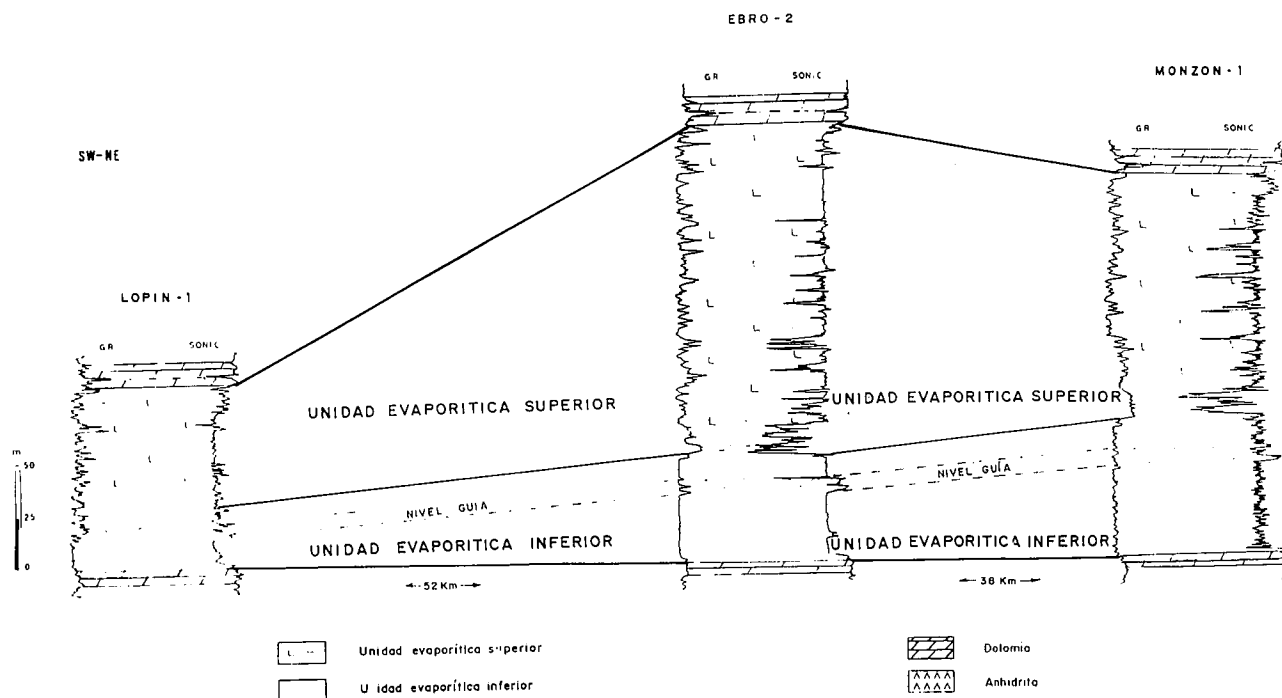


Fig. 4.-Identificación de unidades sedimentarias a partir de las diagrfías y las electrofacies dentro de una serie evaporítica y correlación entre sondeos de las electrofacies correspondientes. Los niveles anhidríticos de la unidad inferior constituyen un nivel guía, isócrono, dentro de la cubeta evaporítica. La unidad evaporítica inferior está constituida por halita y la superior por halita con intercalaciones de lutitas y anhidritas. Muschelkalk medio del Triásico de la cuenca del Ebro.

Fig. 4.-Identification of sedimentary units in evaporites from geophysical logs and electrosequences, and well-to-well correlation of the corresponding electrofacies. Anhydrite levels in the lower unit are key-horizons in the evaporitic sedimentary environment. Lower evaporitic unit is constituted by halite and the upper evaporitic unit is constituted by halite with shale and anhydritic interbeddings. Middle Muschelkalk, Triassic Ebro basin.

de radiactividad natural, de resistividad y en ocasiones de potencial espontáneo suelen reflejar los perfiles granulométricos de las series detríticas. Serra y Sulpice (1975) demostraron la correspondencia entre las secuencias granulométricas reconocidas en testigos y su imagen en el registro de radiactividad natural.

Los principios y métodos del análisis sedimentológico a partir de las diagrfías han sido ampliamente tratados por García Mallo (1984) y no se incide más en ellos aquí por quedar fuera del ámbito de este trabajo.

Serra (1972) definió los conceptos de electrocapa, electrosecuencia y electrofacies, que son básicos en el análisis sedimentológico a partir de diagrfías.

electrocapa: intervalo de profundidad que presenta unas características diagrficas más o menos constantes (Serra, 1972).

electrosecuencia: intervalo vertical, superior a la resolución vertical del dispositivo de medida que presenta una variación progresiva y continua entre dos valores extremos del parámetro de medida, dibujando una rampa (Serra, 1972). Las electrosecuencias que pueden caracterizarse sobre las diagrfías pueden ser de orden métrico, decamétrico e incluso hectométrico, según los casos. En la figura 2 se presentan algunos ejemplos de electrosecuencias.

electrofacies: conjunto de las respuestas de las diagrfías que caracteriza una capa y permite diferenciarla de las que la limitan (Serra, 1972). Esta definición se perfila en el trabajo de Serra y Abbott (1980) que

definen una electrofacies como “el conjunto de respuestas de las diagrfías que caracterizan un sedimento y permiten que éste pueda ser diferenciado de otros”. Esta nueva definición es más amplia que la original y es equivalente al concepto de facies sedimentarias. Esta es la acepción del término electrofacies que se ha adoptado en Jurado (1989) y en los ejemplos que se presentan en este trabajo. En las figuras 3, 4, 5 y 6 pueden observarse ejemplos de electrofacies en materiales detríticos, evaporíticos y carbonáticos.

Para la caracterización de electrofacies se han desarrollado procedimientos gráficos, que consisten en la representación de los valores que pueden leerse en las diferentes diagrfías para una misma electrofacies sobre unas escalas gráficas (véase Serra y Abbott, 1980). En la representación denominada en tela de araña (“*spiderweb*”) se construye un paralelepípedo con vértices en los puntos que corresponden a los valores de cada una de las diagrfías en escalas con una disposición radial. En los diagramas en escalera (“*ladder*”) los valores se representan en ejes de abscisas con una disposición paralela. En ambos casos la electrofacies queda caracterizada por la imagen que resulta de unir los puntos de cada eje, que debe corresponder a una forma característica para la electrofacies considerada.

Factores a tener muy presentes a la hora de identificar las electrocapas, electrosecuencias y electrofacies son la resolución de la herramienta de registro y los factores ligados a la perforación o a las características del

pozo o de los lodos de perforación, que puedan dar lugar a interpretaciones erróneas.

Si al análisis sedimentológico de los perfiles geofísicos en términos de electrosecuencias y electrofacies se suma la información que pueden proporcionar los ripios o testigos (color, componentes, etc) es posible interpretar el perfil vertical en términos del medio de sedimentación, de acuerdo con los modelos sedimentarios que se aplican en geología de superficie. Numerosos trabajos ilustran la aplicación de este método de análisis sedimentario en el subsuelo y a modo de ejemplo pueden destacarse los de Selley (1978), Fisher (1969), Galloway (1968) y Visher (1969).

El análisis sedimentológico a partir de las diagráfias se realiza en general a partir de la apreciación visual del o la intérprete. También existen programas de interpretación para la identificación de facies sedimentarias de forma automatizada (Wolff y Pelissier, 1982) que, si bien no suplen la labor de interpretación sedimentológica, debe reconocerse su interés como primera aproximación a la interpretación de las facies sedimentarias.

También se han caracterizado medios sedimentarios a partir de las diagráfias mediante gráficos de relación ("*cross-plots*") de los valores de las diferentes diagráfias. Este método tiene como principio la idea que la relación entre los parámetros considerados debe ser característica para un determinado medio sedimentario. Rider y Laurier (1979) caracterizaron secuencias del-taicas con este método.

Las electrofacies identificadas a partir del estudio de un conjunto de diagráfias pueden interpretarse como facies sedimentarias (figura 3). La comparación entre sondeos permite extrapolar las electrofacies y en ocasiones caracterizar sedimentológicamente electrofacies identificadas en sondeos próximos. Cualquiera de los posibles métodos de identificación de las electrofacies permite que, una vez identificadas éstas, se establezca la asociación vertical y la asociación de facies característica para un determinado medio sedimentario. Las facies, secuencias o unidades que se identifican en un sondeo pueden reconocerse en otros sondeos, dentro del mismo dominio de sedimentación, y así es posible caracterizar la evolución lateral y la distribución de facies dentro del medio de sedimentación o cuenca en cuestión.

Finalmente, es preciso señalar que, en ocasiones es posible identificar sobre las diagráfias imágenes con carácter de electrofacies cuyo significado sedimentológico no resulta interpretable pero que caracterizan unidades (que pueden ser de origen diagenético, por ejemplo) dentro de la serie sedimentaria.

5. IDENTIFICACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES.

Las sondas de registro de las diagráfias suelen detectar las anomalías o inhomogeneidades de las rocas, ya sean de origen físico o químico. Sobre las diagráfias

estos factores pueden quedar reflejados como puntos con valores anómalos o "picos" o bien como cambios o "saltos" en los valores de los parámetros que se registran.

Los cambios abruptos o saltos en los valores de las diagráfias suelen ser la imagen de superficies de erosión o no depósito, superficies de inundación ("*flooding surface*"), discordancias, fallas, o bien cambios de origen diagenético o del contenido en fluidos (figura 6). Las discontinuidades importantes suelen quedar reflejadas sobre las diagráfias como "picos" anómalos, como "saltos" en los valores registrados, como cambios de buzamiento o de compactación.

De lo que se expone en los párrafos precedentes se desprende que la interpretación de las diagráfias constituye una técnica idónea para el análisis de la estratigrafía secuencial en el subsuelo. En este sentido, y a modo de ejemplo Van Wagoner *et al.* (1988), presentan algunos casos en los que se ilustra la identificación de parasecuencias y otros elementos del análisis de la estratigrafía secuencial sobre diagráfias.

6. DEFINICIÓN DE UNIDADES SEDIMENTARIAS

En anteriores apartados se hace referencia al potencial que presentan las diagráfias para la reconstrucción de los perfiles litoestratigráficos de las series sedimentarias en el subsuelo y para la identificación de unidades. Las diagráfias son el único método geofísico de estudio del subsuelo que, acompañado y apoyado con los datos de la columna del sondeo, ripios y testigos, ha sido aceptado como válido para la definición de unidades estratigráficas en el subsuelo hasta el momento. De acuerdo con el Código Estratigráfico Norteamericano (NASC, 1983) y la Guía Estratigráfica Internacional (GEI, 1980), se pueden definir unidades estratigráficas en los sondeos si los datos del mismo, las diagráfias, permiten una identificación precisa y veraz. El Código Estratigráfico Norteamericano recomienda además que la definición de la unidad incluya las diagráfias apropiadas y en su caso, que se almacene otra información complementaria como son las muestras y los testigos. Se sugiere asimismo (NASC, 1983) que la denominación del estratotipo sea la del sondeo, del campo o de la mina en cuestión en que se hayan registrado las diagráfias y que debe hacerse referencia a los datos necesarios para su localización precisa. Para definir las unidades litoestratigráficas en el subsuelo, según el mismo código, debe hacerse referencia a criterios litológicos y no a las características físicas.

Busson (1972) ilustró ampliamente las aplicaciones de las diagráfias en la definición e identificación de unidades estratigráficas, con su estudio del subsuelo sahariano.

Las unidades definidas a partir de los registros geofísicos pueden o no corresponder a unidades litoestratigráficas formales. Las unidades que se caracterizan en el subsuelo a partir de los registros geofísicos se con-

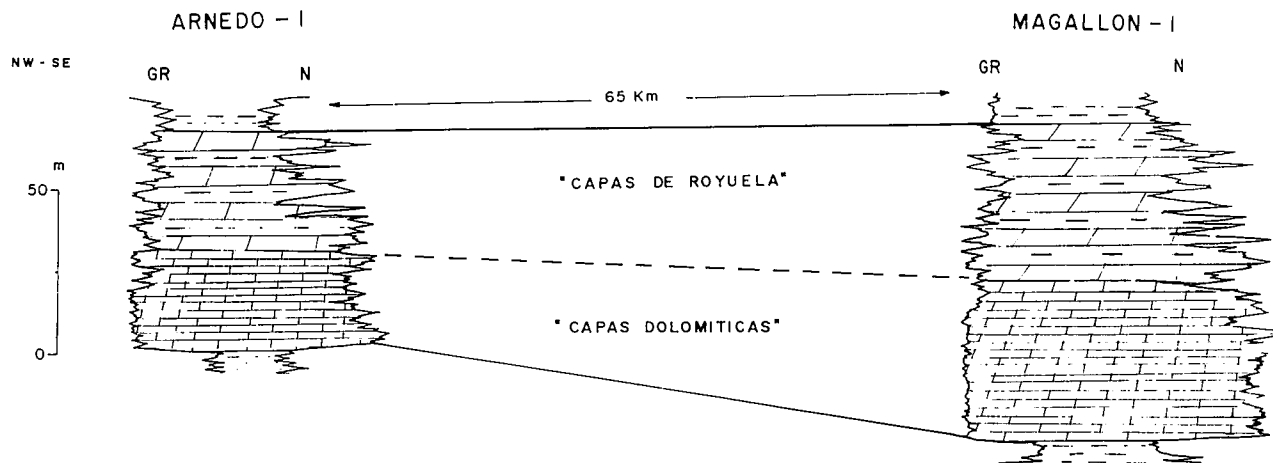


Fig. 5.-Identificación de unidades estratigráficas en el subsuelo a partir de diagrfias. Las unidades identificadas fueron definidas en afloramientos en la Cordillera Ibérica (Hinkelbein, 1969) y los sondeos están emplazados en un área próxima. A pesar de la reducción de potencia que experimentan los materiales hacia el oeste, las diagrfias revelan el "carácter" de cada una de las unidades.

Fig. 5.-Identification of stratigraphic units in the subsurface from geophysical logs. The stratigraphic units were defined in outcrop studies in the Iberian Chain (Hinkelbein, 1969) and the wells are located in a neighbouring area. In spite of the thickness reduction towards the west, well logs show the "character" of each stratigraphic unit.

sideran fundamentales en el análisis estratigráfico pero no se consideran dentro de la jerarquía de las unidades litoestratigráficas y se consideran unidades informales. Las facies deposicionales (electrofacies) se consideran asimismo unidades informales.

Sobre las diagrfias pueden identificarse los cambios litológicos y los cambios en el carácter de la sedimentación, ya que los diferentes procesos de sedimentación, las diferentes litologías y texturas de los materiales suelen tener "carácter" sobre los registros (figuras 1 a 6). A pesar de que el análisis e interpretación de diagrfias se realiza a partir de registros de parámetros físicos con valores concretos (que pueden estar más o menos afectados por factores no relacionados con la geología), la identificación de unidades sobre diagrfias introduce un elemento subjetivo e interpretativo. La delimitación de la unidad en cuestión supone interpretar límites de la misma y caracterizarla como diferente de los materiales infra y suprayacentes. En ocasiones esta identificación es clara si se trata de unidades características pero en otras la interpretación de la importancia o entidad de las superficies que la limitan y de la entidad de la unidad es plenamente interpretativa (hecho frecuente también en estudios de superficie). De hecho, se interpreta que una determinada variación en los valores registrados sobre las diagrfias como un cambio, ya sea litológico o sedimentario (cambios litológicos, cambios de facies o discontinuidades) y constituye el límite de una unidad sedimentaria (figuras 4 y 5).

Según la interpretación estratigráfica y/o sedimentológica de la serie en cuestión, la unidad identificada podrá caracterizarse como un tramo, como una electrofacies, como una unidad litoestratigráfica, (cortejo sedimentario, parasecuencia, etc.), según su escala y su contexto sedimentario dentro de la cuenca (figuras 4, 5 y 6).

Una vez caracterizadas las unidades sedimentarias, éstas pueden ser definidas en un determinado sondeo como unidades tipo e identificarlas en otros sondeos o en afloramientos.

De acuerdo con las categorías de unidades estratigráficas del Código Estratigráfico Norteamericano (NASC, 1983), las unidades formales que pueden definirse a partir de la interpretación de diagrfias son unidades de tipo litoestratigráfico. De manera que, las unidades formales definidas a partir de diagrfias deberán cumplir la Ley de la Superposición y se definirán en función de características "líticas" (composición, textura, fábrica, estructura y color). Estas unidades pueden coincidir por una parte con unidades bioestratigráficas, cronoestratigráficas o geocronológicas.

Como se indica anteriormente, las unidades que se identifican a partir de las diagrfias no siempre reúnen las condiciones para considerarlas como unidades formales pero, en cualquier caso, estas unidades son unidades "operacionales" (Sloss, 1988), es decir, entidades estratigráficas que pueden permitir una cartografía de facies, por ejemplo.

7. CORRELACIÓN.

Las diagrfias han constituido la herramienta de correlación básica de las series en el subsuelo y esa fue, precisamente una de las primeras aplicaciones geológicas que tuvieron las diagrfias en la geología del petróleo.

La correlación es el proceso que se sigue para demostrar la correspondencia que existe entre partes de una unidad geológica separadas geográficamente (NASC, 1983). Según se establece en dicho código de nomenclatura estratigráfica, mediante la correlación se establece la correspondencia que existe entre dos uni-

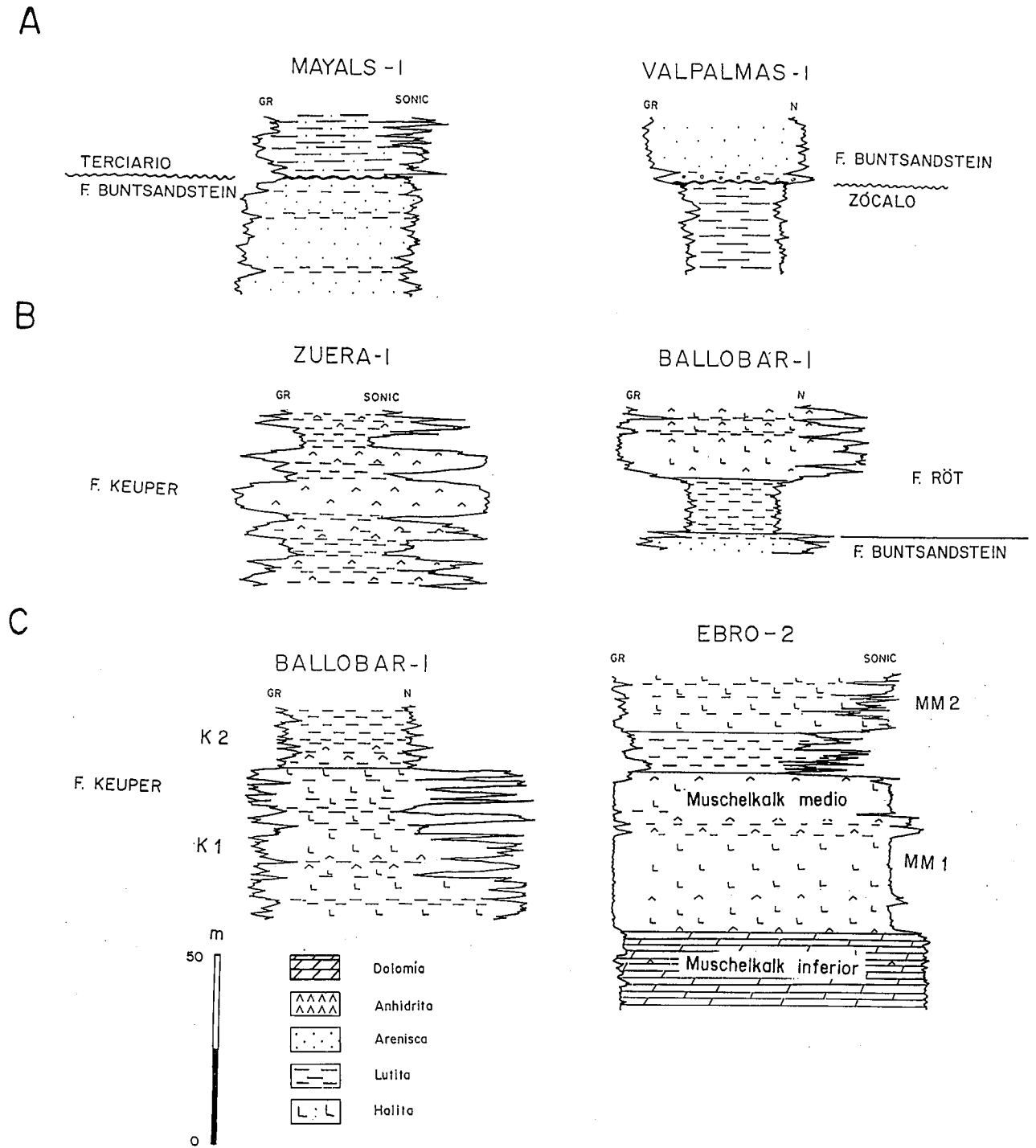


Fig. 6.-Ejemplos de interpretación e identificación de discontinuidades sobre las diagrafas. Estos ejemplos corresponden a: A.-discordancias. B.-cambios litológicos bruscos. C.-contactos entre electrofacies (izquierda) y entre diferentes electrofacies y unidades estratigráficas (derecha) dentro de unidades sedimentarias. Ejemplos de sondeos del Triásico del subsuelo de la cuenca del Ebro.

Fig. 6.-Unconformities some examples: interpretation and identification on well logs. A.-angular unconformities. B.-abrupt lithological changes. C.-boundaries between electrofacies (left side) and between electrofacies and stratigraphic units (right side) within sedimentary units. Triassic Ebro basin.

dades geológicas en cuanto a una determinada propiedad y a una posición estratigráfica relativa. La correlación estratigráfica permite establecer la evolución espacial y lateral de las unidades.

La correlación mediante diagrafas se establece a partir de la comparación entre sondeos de la imagen de las diagrafas y de su similitud morfológica, esta-

bleciéndose las correspondencias entre unidades o tramos (véase figuras 4 y 5).

Meléndez (1974), Martínez Abad (1975) y Suárez *et al.* (1985) y Jurado (1989) ilustran ejemplos de correlaciones mediante diagrafas y su aplicación en estudios regionales.

Los elementos de una serie estratigráfica correlacionables a partir de diagrafas pueden ser: tramos, niveles guía, unidades litoestratigráficas, secuencias posicionales, asociaciones de facies, etc. En ocasiones las diagrafas permiten incluso la correlación de elementos o niveles cuya naturaleza y significado sedimentario se desconoce pero que aparecen repetidamente en las diagrafas de diferentes sondeos. Las correlaciones que se establecen a partir de las diagrafas son en principio litocorrelaciones, ya que las diagrafas reflejan las propiedades litológicas y/o estratigráficas de las series sedimentarias (figuras 4 y 5). No obstante, las correlaciones efectuadas pueden resultar coincidentes con biocorrelaciones y cronocorrelaciones.

Se pueden establecer correlaciones a partir de "picos" o saltos (en los valores de radiactividad, por ejemplo) o de niveles guía (figura 4), que se repiten e identifican en los diferentes sondeos. De alguna forma, los saltos en los valores de las diferentes diagrafas que se repiten en diferentes sondeos son el reflejo de algún proceso común a la sedimentación (o la diagénesis) en el área que se considere. A menudo estos saltos registrados en las diagrafas se identifican como discontinuidades sedimentarias a nivel regional o local (figura 6).

A menudo las correlaciones mediante diagrafas entre sondeos permiten identificar y mostrar la equivalencia lateral de una unidad a pesar de que ésta pueda haber experimentado cambios laterales de facies entre los sondeos (figura 5). De esta forma es posible establecer las relaciones y la evolución lateral de las diferentes facies y unidades.

A partir de la correlación entre sondeos pueden identificarse condensaciones de series, las gunas, repeticiones tectónicas, fallas, etc, ya que se detecta disminución de potencia, omisión o repetición de términos (tramos o unidades) en la sucesión sedimentaria.

También es preciso destacar que las superficies utilizadas para la correlación pueden coincidir con superficies que constituyen líneas de tiempo o bien pueden corresponder a superficies heterócronas, en función de

las características de las unidades o elementos que se correlacionen y cuya equivalencia queda reflejada en su imagen en las diagrafas (figura 4).

8. CONCLUSIONES.

Las diagrafas son una herramienta básica para el reconocimiento, la identificación y la caracterización de las series sedimentarias en el subsuelo.

En el proceso de interpretación de las diagrafas deben tenerse muy presentes los factores no geológicos que pueden afectar a las lecturas de las herramientas.

Las electrofacies que pueden identificarse sobre las diagrafas corresponden por lo general a facies sedimentarias y son por tanto un elemento del análisis sedimentológico (al igual que las electrosecuencias).

La identificación de discontinuidades a partir de las diagrafas es un elemento importante en el análisis sedimentario de las series en el subsuelo.

Una vez realizada la interpretación litológica y sedimentológica de las series sobre las diagrafas, pueden establecerse las unidades sedimentarias correspondientes (facies, secuencias de depósito, parasecuencias, unidades litoestratigráficas, etc), que se identifican sobre las diagrafas.

La correlación mediante diagrafas permite establecer la evolución lateral y espacial de las unidades identificadas en el subsuelo. Estas unidades pueden correlarse a su vez con series de superficie.

AGRADECIMIENTOS

A D. Juan García Mallo y al Dr. D. Oriol Riba, que han mejorado notablemente este trabajo. A los autores de este volumen por la revisión del texto inicial, en especial a los Dres. J.A. Vera y P.F. Santanach, por sus sugerencias y observaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Busson, G. (1972): Principes méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. *Mém. Mus. Nat. Hist. Nat.* n.s., série C, Sci. Terre, 26.
- Fisher, W.L. (1969): Facies characterization of Gulf coast basin delta systems, with some holocene analogues. *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, 19th annual meeting: 239-262.
- Galloway, W.E. (1968): Depositional systems in the lower Wilcox group north-central gulf coast basin. *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, 18th annual meeting: 275-289.
- García Mallo, J.M. (1984): Diagrafas y reconocimiento de facies. *Curso de Sedimentología. Departamento de Estratigrafía. Universidad Complutense Madrid: XXI-1 - XXI-40.*
- GEI (International Subcommission on Stratigraphic Classification, Hedberg, H.D. editor; C. Petzall, A. Salvador, S. Reguant y J.F. Longoria, traductores) (1980): *Guía Estratigráfica Internacional* Reverté, Barcelona, 205 p.
- Hinkelbein, K. (1969): El Triásico y el Jurásico de los alrededores de Albarracín. *Teruel*, 41: 35-75.
- Jurado, M.J. (1989): *El Triásico del subsuelo de la cuenca del Ebro*. Tesis Univ. Barcelona, 259 p.
- Martínez Abad, J.L. (1975): Aplicación de las correlaciones a la investigación petrolífera. *Trab. de Congresos y Reuniones*, ser 7, n.º 2, ENADIMSA.
- Meléndez Hevia, F. (1974): Correlación del Cretácico de la Serranía de Cuenca con el del sondeo Villanueva de los Escuderos-1 (Cuenca). *I Symp. Cret. Cord. Ibérica*, Cuenca 1974.
- NASC (North American Commission on Stratigraphic Nomenclature) (1983): North American Stratigraphic Code.

- Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 67: 841-875.
- Payre, X. y Serra, O. (1979): Turbidites recognized through dipmeter. *SPWLA, 6th Europ. Log. Symp. Trans.*, London. paper K.
- Rider, M.H. y Laurier, D. (1979): Sedimentology using a computer treatment of well logs, *Transactions of SPWLA, 6th Europ. Symp. Trans.*, London. paper J.
- Selley, R.C. (1978): Concepts and methods of subsurface facies analysis. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Cont. Educ. Course, Note Series 9.*
- Serra, O. (1972): Diagraphies et Stratigraphie. *Mém. Bur. Rech. Géol. Min.*, 75: 481-487.
- Serra, O. (1986): Les diagraphies différées: leur emploi en géologie sédimentaire. *Bull. Centres Rech. Explor-Prod. Elf-Aquitaine*, 10, 2: 205-227.
- Serra, O. y Abbott, H. (1980): The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy. *55th Ann. Fall Techn. conf. SPE of AIME*, paper SPE 9270.
- Serra, O. y Sulpice, L. (1975): Sedimentological analysis of shale-sand series from well logs. *SPWLA, 16th Ann. Log. Symp. Trans.*, paper W.
- Sloss, L.L. (1988): Forty years of sequence stratigraphy. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100: 1661-1665.
- Suárez, J., Leret, G., y Martínez del Olmo, W. (1985): Keuper evaporitic sequences from SE Spain. *6th. Eur. Reg. Meet. IAS, Lérida (Spain)*, Apr. 1985. Abstracts, 447-450.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. y Hardenbol, J. (1988): An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C.G.S.C. Kendall, H. Posamentier, C.A. Ross y J.C. Van Wagoner (Eds.): *Sea level changes - An integrated approach*, Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ. 42: 39-45.
- Visher, G.S. (1969): How to distinguish barrier bar and channel sands. *World Oil*, May 1969: 106-113.
- Wolff, M. y Pelissier-Combesure, J. (1982): Faciolog-automatice electrofacies determination. *SPWLA 23rd. Ann. Log. Symp.* 1982: 1-23.

Recibido el 10 de julio de 1989
Aceptado el 8 de octubre de 1989